

UNIVERSIDADE FEDERAL
DO RIO DE JANEIRO



INSTITUTO DE FÍSICA
LICENCIATURA EM FÍSICA

PROJETO DE INSTRUMENTAÇÃO PARA O ENSINO DE FÍSICA

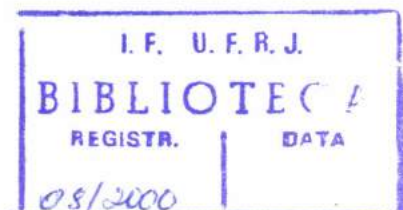
A SUPERCONDUTIVIDADE APLICADA NA SALA DE AULA NO ENSINO MÉDIO

Aluno: Guilherme Gonçalves Sotelo

Orientador: Prof. Vitorvani Soares

08/2000

2000/2



ÍNDICE

I – Introdução	3
II – Aspectos Didáticos	3
Quadro atual do ensino de Física	3
Justificativa da inserção da Supercondutividade no ensino médio	5
Propostas dos PCNEM e contextualização da supercondutividade para o ensino de Física	5
Habilidades e Competências a serem desenvolvidas com a Supercondutividade	7
III – Evolução da Ciência no campo da criogenia e da supercondutividade	8
Como era a ciência há cem anos atrás	8
Kamerlingh Onnes e a descoberta da liquefação do hélio	11
Kamerlingh Onnes e a descoberta da supercondutividade	15
IV – Alguns conceitos teóricos sobre a Supercondutividade	17
Resistência elétrica nula	17
Temperatura Crítica	19
O Efeito Meissner	20
Equações eletromagnéticas de um supercondutor	21
V – Demonstrações e Experimentos sugeridos com supercondutores	28
(i) Levitação Magnética	28
(ii) Medida da resistência elétrica em função da temperatura de um supercondutor	29
Objetivos	29
Descrição dos aparatos	29
Procedimento Experimental	34
Resultados	35
Análise dos resultados	37
VI – Conclusões	38
VII – Referências	39

Resumo

Neste trabalho, procura-se mostrar as problemáticas que estão relacionadas com o ensino de física, e apresentar algumas sugestões que visam dar uma pequena contribuição para a melhora da educação. Neste quadro, a supercondutividade pode ser utilizada pelo docente como uma ferramenta pedagógica para contribuir no processo cognitivo. Sendo assim, a implementação de demonstrações e experiências nesta área tornam-se necessárias para complementação do processo de ensino-aprendizagem.

I – Introdução

A supercondutividade tem se mostrado um fenômeno físico de grande importância científica e de inúmeras aplicações tecnológicas. Atualmente este assunto só é estudado detalhadamente por alunos de pós-graduação, ficando muitas vezes excluído de cursos básicos de física para ciências exatas.

vide Feynman !! 1966!! (Vol III - 21 1966!!)

Este trabalho tem como propósito a apresentação do fenômeno da supercondutividade de uma forma simples e qualitativa, visando a introdução do assunto no ensino médio.

II – Aspectos Didáticos

Quadro atual do ensino de Física

O quadro atual do ensino brasileiro não é animador, e no caso do ensino de física a situação não é diferente. Se não bastassem as precárias condições da maioria das escolas, o corpo docente se encontra desestimulado e bastante desgastado. *mal formado* O corpo discente apresenta, de uma forma geral, um descaso pelo aprendizado da física, que aliado as metodologias de ensino inadequadas utilizadas por alguns professores (que muitas vezes massificam conteúdo), proporcionam aos alunos a passagem pelo ensino médio sem aprender nada substancial sobre os métodos empregados em física.

Vejam agora, segundo os Parâmetros Curriculares Nacionais [PCNEM] (pág. 48), sobre o quadro atual da física no ensino médio, temos:

“O ensino de Física tem-se realizado freqüentemente mediante a apresentação de conceitos, leis e fórmulas, de forma desarticulada, distanciados do mundo vivido pelos alunos e professores e não só, mas também por isso, vazios de significado. Privilegia a teoria e a abstração, desde o primeiro momento, em detrimento de um desenvolvimento gradual da abstração que, pelo menos, parta da prática e de exemplos concretos. Enfatiza a utilização de fórmulas, em situações artificiais, desvinculando a linguagem matemática que essas fórmulas representam de seu significado

físico efetivo. Insiste na solução de exercícios repetitivos, pretendendo que o aprendizado ocorra pela automatização ou memorização e não pela construção do conhecimento através das competências adquiridas. Apresenta o conhecimento como um produto acabado, fruto da genialidade de mentes como a de Galileu, Newton ou Einstein, contribuindo para que os alunos concluam que não resta mais nenhum problema significativo a resolver. Além disso, envolve uma lista de conteúdos demasiadamente extensa, que impede aprofundamento necessário e a instauração de um diálogo construtivo.”

Percebe-se que os PCNEM destacam bem os problemas atuais da física, que somados a toda problemática da educação (de uma forma geral), tendem a piorar ainda mais a situação do ensino de física. Isto é consequência de um sistema educacional enciclopédico, que enfatiza muitas vezes a educação básica como um trampolim para a formação superior, sem a preocupação de tornar os alunos seres críticos. O ensino em física não sabe priorizar uma formação conceitual e contextualizada, de forma que se torna ineficaz e é incapaz de fornecer ao estudante habilidades e competências para este resolver sozinho os diversos futuros problemas que terá pela frente.

Vejamos agora segundo a Lei de Diretrizes e Bases [LDB/96] em seu artigo 35 sobre as finalidades da educação no ensino médio, tem-se que:

“O aprimoramento do educando como pessoa humana, incluindo a formação ética e o desenvolvimento da autonomia intelectual e do pensamento crítico; a compreensão dos fundamentos científico-tecnológicos dos processos produtivos, relacionando a teoria com a prática, no ensino de cada disciplina.”.

Como pode ser observado no parágrafo acima, a educação básica não tem conseguido cumprir com as exigências que são determinadas pela lei de diretrizes e bases, e é um dos papéis do ensino em física cumprir com estas finalidades.

Como solução para estes problemas torna-se necessária uma pequena reformulação no ensino de física, com a inserção de novos temas que pareçam mais atraentes para os alunos. O começo para os docentes é (acima de tudo) exercer a profissão com dedicação, pois os mestres são algumas engrenagens fundamentais de um mecanismo que se chama educação, onde a peça principal deste mecanismo não é o professor, mas o aluno.

As mudanças no quadro atual da educação devem partir dos professores, pois quando um docente se encontra a frente de uma turma, este tem plenos poderes para moldar seus alunos, que

serão parte integrante do futuro deste país. Se fizer um bom trabalho, exercendo corretamente o papel de educador e dando uma ótima formação sócio-cultural e humana para estes estudantes, estará contribuindo não somente para a melhora da educação e da física, mas também para a melhora de toda a nação.

Justificativa da inserção da Supercondutividade no ensino médio

Este quadro do ensino de física vem afetando quase todas as instituições de ensino. Pode então perceber que o desinteresse pela física, não é uma característica exclusiva desta matéria. Hoje em dia, os alunos não se interessam por disciplina alguma, e quando estes se dedicam a alguma matéria é devido algum diferencial do professor ou da atividade envolvida na aula. Este é um dos pontos em que este trabalho dedica grande atenção, que é o fato de despertar a curiosidade dos alunos sobre como ocorrem determinados fenômenos físicos; Acredito que, neste caso, a supercondutividade pode preencher completamente os requisitos necessários para despertar nos alunos esta vontade de aprender e fornecer aos estudantes uma formação muito mais ampla, com uma visão mais crítica do mundo em que vivemos.

A supercondutividade pode abordar diretamente na sala de aula, tópicos de física como: a eletricidade, o magnetismo, a termodinâmica, e algumas noções de física quântica, isto sem comentar os aspectos históricos e as diversas aplicações tecnológicas que envolvem este fenômeno, tornado assim esta área uma das mais abrangentes da física.

Outro fator que pode ser destacado a favor da inserção da supercondutividade no ensino médio é a beleza apresentada pelas experiências que envolvem este fenômeno. Destaco a levitação magnética que é uma experiência bastante impressionante, que poderia ajudar a estimular os alunos na busca do aprendizado de física.

Propostas dos PCNEM e contextualização da supercondutividade para o ensino de Física

Como comentado inicialmente e também pela prática da sala de aula sabe-se que a situação do ensino de física está longe do ideal que almejamos.

Segundo os PCNs, os conhecimentos em física devem ser contextualizados, onde é tarefa do professor inserir novos conteúdos que sejam relacionados com o cotidiano do aluno. Estes conhecimentos devem estar vinculados aos fenômenos físicos e devem ter um significado maior que a simples resolução de um problema teórico. O parágrafo abaixo (PCNEM / pág. 50) retrata muito bem isto.

“..., é imprescindível considerar o mundo vivencial dos alunos, sua realidade próxima ou distante, os objetos e fenômenos com que efetivamente lidam, ou os problemas e indagações que movem a curiosidade. Esse deve ser o ponto de partida e, de certa forma, também o ponto de chegada. Ou seja, feitas as investigações, abstrações e generalizações potencializadas pelo saber da Física, em sua dimensão conceitual, o conhecimento volta-se novamente para os fenômenos significativos ou objetos tecnológicos de interesse, agora com um novo olhar, como o exercício de utilização do novo saber adquirido, em sua dimensão aplicada ou tecnológica. O saber assim adquirido, reveste-se de uma universalidade maior que o âmbito dos problemas tratados, de tal forma que passa a ser instrumento para outras e diferentes investigações.”

Entre as funções do ensino de física, uma que considero de suma importância é o desenvolvimento de habilidades para solucionar problemas, a partir da utilização dos conhecimentos já adquiridos pelos alunos. Com esta habilidade desenvolvida o aluno se tornaria sagaz e estaria apto a compreender o mundo em que vivemos. Assim, o professor seria capaz de contextualizar os conhecimentos desenvolvidos em cada tópico da física tornando o processo ensino-aprendizado algo agradável e prazeroso para todos. Tudo isto poderia ser facilmente alcançado e desenvolvido com um tema tão versátil e que abrange tantos tópicos da física, como é a supercondutividade.

Segundo os PCNEM, o ensino de física deve ter uma grande influência atribuída à História e Filosofia da Ciência como também existem sugestões de inclusão da Física Moderna nos currículos, o que indica como objetivo da renovação do ensino de física a aproximação entre a ciência e o cidadão comum, tão prejudicada em nosso tempo. Isto visaria o acompanhamento em sala de aula do crescimento exponencial da tecnologia e uma compreensão das mudanças de paradigmas que envolvem a construção humana e as evoluções das novas teorias, mostrando que a física é uma ciência eternamente inacabada. A física deve então enfatizar o aspecto ensino, combinando o conteúdo específico e os progressos da ciência e da tecnologia com os propósitos gerais da educação, colocando para os estudantes a produção científica ao alcance de sua interpretação e desenvolvendo sua capacidade crítica como ser pensante.

O ensino de física deve ser estimulado por trabalhos que procuram uma interdisciplinaridade, aliados aos trabalhos que têm o cotidiano como foco principal. Ambas devem apresentar o seu referencial teórico, sem distanciar a teoria da prática. Este objetivo para o ensino de física pode ser alcançado com o auxílio de outras disciplinas como: a química (cálculos

estequiométricos para as amostras supercondutoras), a história (evolução da humanidade e as novas descobertas que levam a mudanças de paradigmas), a matemática (ferramenta de trabalho indispensável na física), geografia (relação social-política entre os países desenvolvidos tecnologicamente e os que não são), etc...

O ensino de física deveria ser muito influenciado pelo grande desenvolvimento desta ciência nestas últimas décadas. O mundo hoje é totalmente tecnológico (veículos que se movimentam sobre levitações e propulsões magnéticas, computadores, telefonia celular, etc) e a física ensinada ainda é somente a física de dois ou três séculos atrás. Por exemplo, em 1911, Kamerlingh Onnes descobriu a supercondutividade, e hoje até temos condições de ensinar temas como este para os alunos do ensino médio, porém, ainda existem muitas dificuldades a serem superadas para que se faça alguma reformulação nos currículos.

Outra característica importante que pode ser desenvolvida com a supercondutividade deve ser a investigações de conceitos espontâneos e a capacidade de integração do alunado com outros campos de estudos, por exemplo, a linguagem, a epistemologia genérica, a aprendizagem significativa, entre outros.

Habilidades e Competências a serem desenvolvidas com a Supercondutividade

A supercondutividade não está entre os tópicos abordados comumente no ensino médio, porém, como dito anteriormente, o tema é tão versátil que é possível introduzi-lo dentro de um caráter interdisciplinar sem a menor dificuldade.

A intenção inicial é de desenvolver primeiramente as noções qualitativas e conceituais, de forma que os alunos compreenderiam bem quais são as grandezas físicas envolvidas e não confundiria, por exemplo, diferença de potencial elétrico com corrente elétrica. Como sugestão para isto, poderíamos fazer com os alunos varias analogias com temas de seu cotidiano, para que ocorresse a construção efetiva deste conhecimento. Assim o aluno estaria motivado e encontraria alguma relação entre os conteúdos desenvolvidos na aula de física e o seu dia a dia.

As habilidades desenvolvidas pelos alunos nesta parte inicial são muitas, e entre elas destacam-se: maior facilidade para compreender os conceitos eletromagnéticos como também capacitação para a resolver alguns problemas teóricos ou práticos. Desta forma, certamente o aluno desenvolverá a sua capacidade intelectual tanto para serviços que podem envolver raciocínio lógico quanto para outros que necessitem de habilidade no manuseio de equipamentos ou análise de dados.

Ainda na parte prática, mais adiante, é proposta uma atividade que além de desenvolver os conceitos que envolvem a supercondutividade, necessitam também da análise dos dados obtidos experimentalmente. Esta experiência desenvolveria nos alunos o sentido prático de um problema de

física e ajudaria a desenvolver o raciocínio lógico fundamental para resolução de qualquer problema.

A coleta de dados e na análise do problema, a partir dos resultados obtidos, seria de suma importância para a compreensão quantitativa dos conceitos físicos. Nesta etapa, poderiam ser usados recursos como: a construção de gráficos, uso de equações, solução de problemas e utilização da matemática como ferramenta de auxílio, isto tudo serviria para encontrar as soluções desejadas.

Com todas esses tópicos desenvolvidos, acredito que o aluno estará adquirindo diversas das habilidades descritas durante todo este trabalho e que são fundamentais para a formação do estudante tanto quanto cidadão como ser humano que sabe usar bem os conhecimentos adquiridos em física na sua profissão e no seu dia-a-dia.

Desta forma acredito que a maior função desta proposta de trabalho para a sala de aula seria a de fazer com que os alunos mudassem suas concepções sobre a física, onde o pavor e o desinteresse pela física dariam lugar para o prazer aprender e entender como é o mundo em que vivemos.

III – Evolução da Ciência no campo da criogenia e da supercondutividade

A supercondutividade é um fenômeno físico que possibilita diversas das mais recentes aplicações tecnológicas e científicas. Apesar dos equipamentos que utilizam supercondutores serem considerados muitas vezes de última geração, a supercondutividade já é conhecida pelos cientistas há quase um século.

Para que se possa entender melhor este fenômeno físico é preciso fazer uma viagem no tempo e voltar uns cem anos, para saber como era a ciência naquele tempo. Somente desta forma poderemos começar a entender como ocorre uma descoberta científica e o que leva os pesquisadores a buscar os modelos e teorias que expliquem os fenômenos naturais, que é o que chamo, em sua essência, de física.

Como era a ciência há cem anos atrás

A supercondutividade foi descoberta em 1911 pelo cientista holandês Heike Kamerlingh Onnes em seu laboratório na Universidade de Leiden. A descoberta de Onnes só foi possível devido à outra grande contribuição deste cientista, que foi a liquefação do hélio. Para compreender como foi possível liquefazer o hélio deve-se buscar as respostas em como se sucedeu a evolução dos processos de resfriamento dos gases e a causa da busca e do interesse em se estudar os materiais em baixas temperaturas. Então devemos voltar ainda mais no tempo para uns trinta anos antes da descoberta da supercondutividade.

informação relevante? 9

Em 1880, os Estados Unidos da América não era o lugar onde as descobertas em física eram feitas, mas estas ocorriam nos laboratórios do norte da Europa. Naquela época um considerável número de cientistas se ocupava da busca pela liquefação dos gases (que sobre condições normais de temperatura e pressão estão no estado gasoso), como o nitrogênio, o oxigênio, e o hidrogênio entre outros. O método de liquefação usado pelos cientistas era similar ao usado atualmente pelos laboratórios, que é o de liquefação em cascata de diferentes gases, onde cada diferente substância passaria para o estado líquido quando os valores de temperatura e pressão necessários para a liquefação fossem atingidos. Então várias máquinas foram construídas com este propósito, e cientistas foram encontrando temperaturas cada vez menores e tentavam alcançar a menor temperatura considerada atingível, -273°C . Os cientistas acharam conveniente definir esta temperatura em uma nova escala, chamada de escala absoluta ou escala Kelvin, cujo valor mínimo é 0 K.

O fato de que havia uma temperatura mínima foi idealizado no final do século XVII, quando foi observado que uma diminuição da temperatura do ar era acompanhada de uma queda proporcional na pressão, onde não era difícil calcular, a partir dos dados experimentais obtidos na época, que quando a ^{tende} pressão chegava zero a temperatura tendia ao valor limite de -273°C (equivalente a 0 K). Mais tarde foi descoberto que o valor zero na escala Kelvin não poderia ser atingido por nenhuma máquina construída pelo homem, mas isto não era conhecido pelos cientistas da época.

Segundo Vidali [1], em 1877, Cailliet desenvolveu em Paris um aparato capaz de liquefazer gases. Sua complexa máquina era composta de um amontoado de canos, capilares e recipientes em que um gás era comprimido a uma alta pressão. A liquefação do acetileno foi obtida com esta máquina acidentalmente enquanto Cailliet e seus assistentes realizavam uma experiência com este gás, que sob alta pressão rompeu um dos capilares e formaram-se (por um período bastante curto) gotículas nas paredes de vidro do equipamento. Cailliet concluiu que aquelas gotículas eram a condensação do vapor de acetileno frio, onde realmente eles conseguiram liquefazer o acetileno.

A partir desta experiência (acidental) que corroborou ^{a prova de} para a correta teoria de que quando um gás pressurizado é expandido para uma região de baixa pressão (que pode ser o vácuo), o gás é resfriado. Sobre condições apropriadas este resfriamento é suficiente para que o gás condense. Em pouco tempo após o acetileno, Cailliet liquefez o oxigênio usando a mesma técnica, mas obtendo um importante resultado, que foi a temperatura de ebulição do oxigênio líquido de 90 K sobre a pressão de uma atmosfera. Surgiram nesta época questões como: Será que todos os gases podem ser condensados? Quais as temperaturas e pressões necessárias para alcançar a liquefação de um gás?

Revisão!!!

neu

Qualquer

Durante bastante tempo os cientistas não obtiveram praticamente nenhuma evolução significativa nesta área, até que James Dewar desenvolvesse um recipiente capaz de manter um líquido resfriado a temperaturas muito menores que a temperatura ambiente por um longo tempo. O princípio físico desta invenção é bastante simples, consistindo de um recipiente que possui duas paredes e retira-se o ar existente entre ambas as paredes, fazendo então um vácuo. Então, a única forma de fornecer calor para o líquido era através de radiação. Este tipo de vasilhame é chamado atualmente de “dewar”, ou conhecido popularmente como garrafa térmica.

Tempo de
vácuo!!!



Figura (1): A garrafa térmica na mão de seu inventor.
(figura retirada de Soulen [2]).

A disputada competição para ser o primeiro a liquefazer um gás, mostrava um outro lado da ciência, onde pesquisadores reivindicavam e contrareivindicavam descobertas de novas liquefações de gases com temperaturas de ebulição cada vez menores. Anúncios de descobertas ainda não obtidas eram feitos por alguns grupos, na tentativa de obter os créditos de um trabalho que poderia ser feito primeiramente por outro grupo de pesquisa. Como exemplo disto, segundo Vidali [1], temos que em maio de 1889, Dewar apresentou um paper na Royal Society que falava sobre a liquefação do hidrogênio, e um colega dele, Ramsey, publicou uma reivindicação da “paternidade” da descoberta para Olszewski, alegando que este já havia obtido o nitrogênio líquido. Esta suposta descoberta de Olszewski não era verdadeira e era baseado somente em rumores. Quando Ramsey soube que a sua reivindicação havia sido negada, ele sequer se retratou publicamente com Dewar, que publicou seu trabalho em meio a controvérsias. Como resultado obteve-se um relacionamento não harmonioso entre Dewar e Ramsey.

e

bugaram?

Então, o maior prejudicado foi o próprio Dewar, que além de ter o resultado de seu trabalho questionado pelo meio científico, ganhou a inimizade de Ramsey, que era uma das poucas pessoas da época capazes de obter quantidades suficientes de hélio, que foi descoberto em 1869 por espectroscopia, pelo próprio Ramsey, ao realizar análise do sol.

O hélio é um gás inerte e bastante escasso, e para obter este material é algo bastante trabalhoso. Como o hélio era o último gás inerte que faltava ser liquefeito, havia uma expectativa da temperatura de ebulição do hélio líquido ser ainda menor que a do hidrogênio. O fator que motivou esta nova corrida para a liquefação do hélio não era somente a honra de ser o primeiro a liquefazer este gás; Envolveria também a possibilidade de estudar os comportamentos dos materiais quando sua temperatura é bem próxima ao valor do zero absoluto.

Dewar não conseguiu obter o hélio líquido, já que não conseguiu quantidades suficientes deste gás e o pouco que ele possuía era bastante impuro, ficando assim de fora da corrida.

Não devemos deixar passar em branco as descobertas feitas por Dewar, pois se não fosse por sua idéia bastante simples, porém genial de desenvolver um recipiente que não trocasse calor com o meio externo, provavelmente haveria um grande atraso em toda a ciência.

Kamerlingh Onnes e a descoberta da liquefação do hélio

Heike Kamerlingh Onnes assumiu o posto de chefe do departamento de física experimental da Universidade de Leiden, na Holanda, em 1882, e conseguiu tornar Leiden no centro mundial de pesquisas em baixas temperaturas. O seu trabalho no desenvolvimento dos equipamentos exigia muita técnica e extrema habilidade para conseguir os resultados desejados. Trabalhar para Onnes era uma honra, e assim foi possível para ele contar com os melhores profissionais disponíveis nesta época, que quando não eram convidados para trabalhar em Leiden, eram formados pela própria universidade.



Figura (2): Heike Kamerlingh Onnes
(Figura retirada de Vidali [1]).

A metodologia de trabalho de Onnes enfatizava primordialmente a necessidade de medidas acuradas, porém, a precariedade dos equipamentos da época dificultava a obtenção dos resultados esperados. Um ponto de fundamental importância para o sucesso das pesquisas nos laboratórios da Universidade de Leiden foi a criação de uma escola de instrumentação, que formava os técnicos e os pesquisadores fornecendo a estes a base necessária para desenvolver a pesquisa científica.

Após Kamerlingh Onnes, a física experimental ganhou novas dimensões. Isto eu afirmo devido a metodologia de trabalho científico que foi utilizada por Onnes, que tinha como ponto fundamental a importância dos resultados quantitativos experimentais realizados inúmeras vezes. Segundo o seguinte parágrafo que se encontra no artigo de Jacobus de Nobel [4], que ingressou em Leiden em 1931, destaco a seguinte passagem que informa claramente como era o trabalho de Onnes:

"..., as contribuições de Kamerlingh Onnes foram muito além das duas descobertas de época. Ele foi o originador de um novo estilo de fazer ciência, o primeiro a reconhecer a importância do suporte técnico em larga escala, e seu laboratório e assistentes foram similares ao projetos de "ciência grande" de hoje em dia. O sucesso do laboratório foi o resultado da importância dada a infraestrutura, combinada com o rigoroso programa científico que foi firmemente baseado em discernimentos teóricos, todos que transcenderam seu controverso ditado: "Door meten tot weten" (Das medições ao conhecimento)".

Um fato que chama à atenção, é que em muitos dos artigos que foram escritos por Onnes, somente aparecia o seu nome como autor dos trabalhos, que havia me levado algum tempo atrás à precipitada conclusão de que Onnes trabalhava sozinho, o que não é verdade.

Nomes de outros cientistas, como o de van der Waals, aparecem em seus papers somente em um agradecimento ou como uma colaboração para as descobertas científicas.

O parágrafo abaixo ressalta a passagem que destaca a data que se obteve pela primeira vez a liquefação do gás hélio, que foi o dia 10 de julho de 1908, onde Onnes escreveu em um de seus trabalhos o seguinte:

"Foi um momento maravilhoso quando o líquido, que parecia imaterial, foi visto pela primeira vez. Ele não tinha sido

observado quando ele escorria dentro do recipiente; sua presença pôde ser detectada somente quando o recipiente estava cheio. Sua superfície mostrou-se perfeitamente definida como o limite de uma faca contra a parede do recipiente. Eu estava muito contente quando pude mostrar o hélio liquefeito para meu amigo van der Waals, cuja teoria tem sido guia na liquefação do começo ao fim”.



Figura (3): Onnes (e) ao lado de van der Waals (d) em Leiden. (figura retirada de Vidali [1]).

Como o parágrafo acima destaca, Onnes não trabalhava sem algum tipo de ajuda e provavelmente seu objetivo não seria atingido se não fosse devido a vários fatores, que são entre eles: o conhecimento acumulado por outros cientistas durante anos, a sua dedicação de quase trinta anos para chegar ao seu objetivo (desde a construção do laboratório até a obtenção do hélio líquido), a capacitação de pessoas para executar trabalhos como desenvolver equipamentos e coletar dados coerentemente, e principalmente o conhecimento teórico que serviu como alicerce para atingir seus objetivos experimentais. Este fato corrobora para acabar com uma divergência que existe entre alguns físicos extremistas que acreditam que fazer física é somente desenvolver teorias ou aqueles que ainda acreditam que fazer física é somente coletar dados. Acredito que para ser um bom físico é preciso ter uma mistura balanceada de cada um destes dois elementos, ou seja, a teoria vinculada à prática, e é desta forma que se deve ensinar física para os alunos.

As figuras (4) e (5) destacam os complexos aparatos usados por Kamerlingh Onnes para a liquefação do hélio.

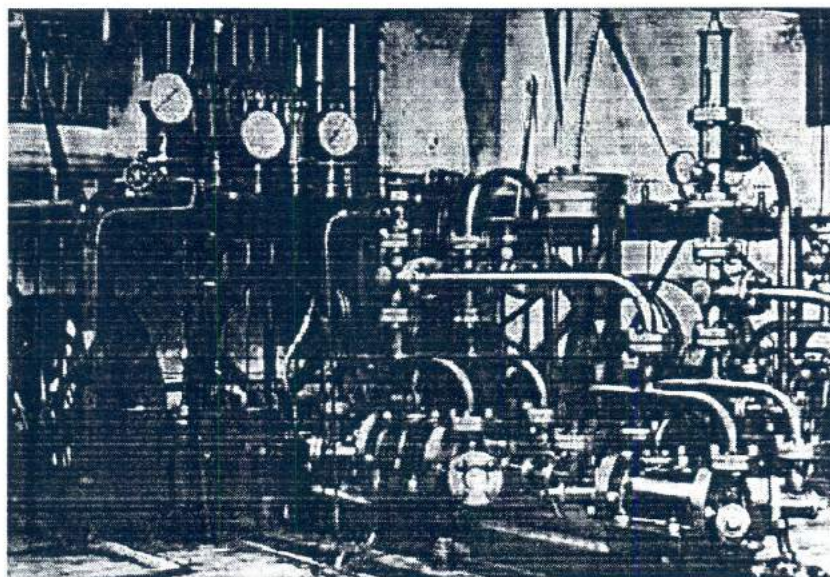


Figura (4): Aparatos usados no laboratório de Onnes.
(Figura retirada de Vidali [1]).

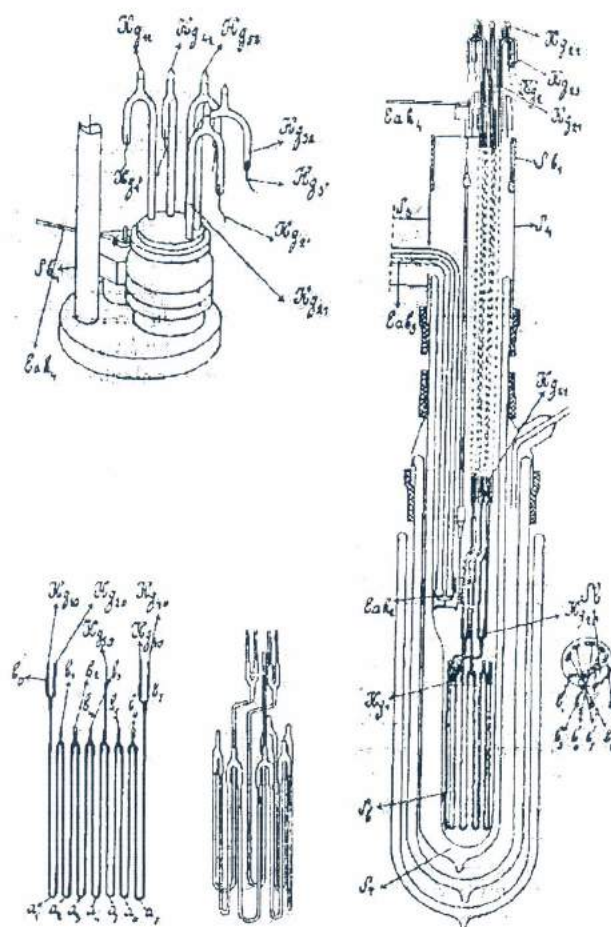


Figura (5): Esquema do sistema de refrigeração do hélio.
(figura retirada de Onnes [3]).

Kamerlingh Onnes e a descoberta da supercondutividade

Quando é feita uma leitura do artigo de Onnes [3] sobre a supercondutividade, tem-se a nítida idéia que a sua descoberta ocorreu somente devido a uma análise crítica dos resultados experimentais, baseada em uma minuciosa busca pelo comportamento elétrico dos condutores, quando estes estão a uma temperatura próxima ao zero absoluto. Esta é a idéia que seus artigos passam ao serem lidos, porém em um texto científico nunca é transmitido o “mapa da mina” para encontrar uma grande descoberta, nem o caminho a ser percorrido para ganhar o tão sonhado premio Nobel, que todos os físicos do mundo almejam.

O fato mais intrigante é que a descoberta do hélio líquido foi encarada festivamente e com grande entusiasmo pelos cientistas do laboratório de Leiden, enquanto que a descoberta da supercondutividade foi friamente apresentada ao mundo como somente mais uma descoberta científica, não recebendo por parte dos cientistas a devida importância que tem este fenômeno físico. Como exemplo tem-se o premio Nobel que Onnes recebeu em 1913, que só comentava sobre a liquefação do hélio e sobre a suas pesquisas sobre as propriedades dos materiais a baixas temperaturas, sem mencionar diretamente a descoberta sobre a supercondutividade.

Segundo Jacobus de Nobel, em seu artigo [4], a descoberta da supercondutividade ocorreu acidentalmente devido a uma falha de um dos assistentes do laboratório de Onnes. Em seu artigo Nobel destaca os bastidores do laboratório da Universidade de Leiden e aqueles que lá trabalhavam. Um dos fieis assistentes de Onnes, Gerrit Jan Flim, contou para Jacobus de Nobel, anos após, como se deu tal descoberta. Em Leiden havia alunos que trabalhavam ajudando os pesquisadores a desenvolver os experimentos, que eram como os estudantes de iniciação científica de hoje em dia. Estes estudantes eram chamados de “*blauwe jongen*” (garotos azuis), devido à cor dos trajes usados pelos alunos dentro do laboratório.

Todo o serviço que era considerado “chato” de ser executado e que nenhum pesquisador gostava de fazer era realizado pelos garotos azuis, que muitas vezes não conseguiam manter-se compenetrados no serviço durante um período de tempo muito longo. Um desses serviços era o de controlar o nível da pressão do hélio no recipiente onde estavam armazenados os metais cujas características elétricas estavam sendo analisadas. Inúmeras experiências estavam sendo realizadas com o mercúrio purificado (que foi escolhido devido à facilidade de sua purificação a temperatura ambiente), porém, os cientistas observavam a que neste metal havia a passagem de corrente elétrica e não havia uma diferença de potencial elétrico sobre o mercúrio. A conclusão imediata de todos foi a de que havia um curto circuito, e toda vez em que faziam inspeções nos equipamentos os pesquisadores encontravam o suposto curto circuito.

Um certo dia, um “garoto azul” chamado de Gilles Holst, enquanto fazia experimentos mediando a resistividade elétrica do mercúrio que se encontrava a temperaturas da ordem de mK,

acabou pegando no sono e não abriu a válvula que fazia o controle da pressão do hélio no recipiente onde se encontrava o mercúrio. Com este “esquecimento” houve um aumento da temperatura no interior do recipiente para o valor da temperatura de ebulição do hélio líquido (4,2 K), e foi possível observar que o “curto circuito” havia desaparecido, devido à deflexão do ponteiro do galvanômetro (do voltímetro) que media a diferença de potencial sobre o mercúrio (pois o mercúrio ultrapassou o valor de sua temperatura crítica de transição de condutor para supercondutor).

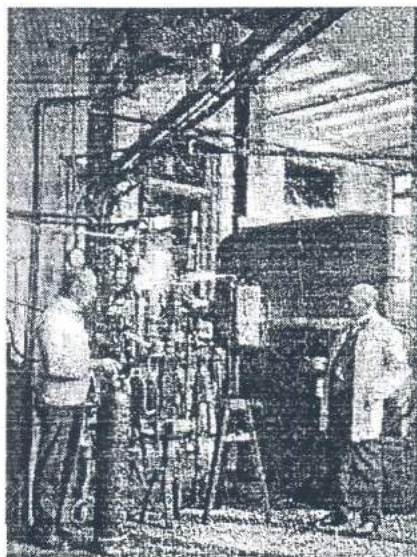


Figura (6): Onnes (d) ao lado de Flim (e).
(Figura retira de J. de Nobel [4]).

Logo os cientistas puderam comprovar que se tratava de um novo fenômeno físico, que foi chamado primeiramente por Onnes de “supracondutividade”.

Este fato não foi relatado no artigo de Onnes [3] que trata sobre a descoberta da supercondutividade, o que era de se esperar de um artigo científico. O seu artigo fala de uma forma sóbria e consistente que esta descoberta se deu quando Onnes resfriava o mercúrio (entre outros metais), com objetivo de entender seus comportamentos elétricos a baixas temperaturas. Desta forma, então, Heike Kamerlingh Onnes apresentou, em 1911, para o mundo a sua mais nova e grande descoberta, que é a supercondutividade.

Então a supercondutividade foi caracterizada por Onnes como a queda da resistividade elétrica do mercúrio para zero quando a sua temperatura possuía valores inferiores a 4,2 K. A este valor de temperatura, onde ocorre a transição do estado condutor para o supercondutor, é atribuído o nome de temperatura crítica do supercondutor, que é abreviado como T_c .

Estudaremos abaixo algumas propriedades e características dos supercondutores, como as teorias e modelos que podem ser usados para explicar o fenômeno da supercondutividade.

IV – Alguns conceitos teóricos sobre a Supercondutividade

Resistência elétrica nula

A resistividade elétrica de um metal é diretamente proporcional a temperatura a que o metal está submetido, isto significa que conforme o metal é resfriado sua resistência elétrica diminui gradativamente. Para entender isto, é preciso considerar as causas da resistência elétrica em um condutor. A corrente elétrica pode fluir em um metal devido aos elétrons livres que este possui, que podem se movimentar livremente pela rede cristalina do metal. A rede cristalina deste metal pode ser representada pela figura (7), onde apresentamos um modelo simplificado de uma rede cristalina de um metal que é composta de íons positivos em volta de elétrons livres.

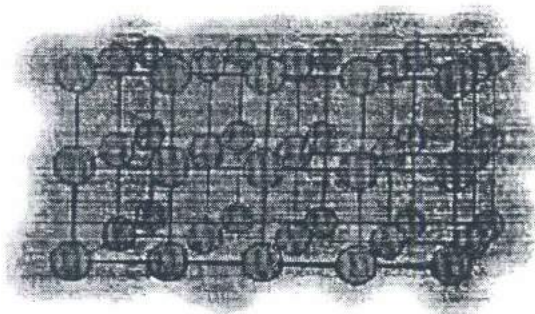


Figura (7): Modelo simplificado da rede cristalina de um metal.
(Figura retirada de F. Ostermann [8]).

Um elétron se deslocando por um metal pode ser representado por uma onda plana, cujo sentido de propagação é o mesmo da corrente elétrica. Quando a rede cristalina não possui imperfeições os elétrons poderão fluir sem que ocorra perda de momento naquela direção, o que significaria uma resistência elétrica nula. Entretanto, se algo na rede cristalina interagisse com a onda do elétron, representaria então a presença de uma resistência elétrica. Dois fatores poderiam ser responsáveis por esta interação, um destes fatores é devido a vibração dos íons da rede cristalina para temperaturas superiores a do zero absoluto, e o outro seria devido a alguma impureza ou imperfeição da rede cristalina. Ambos fatores seriam responsáveis pela resistência elétrica.

Sabemos agora por que a diminuição da temperatura do metal ocasiona a diminuição de sua resistividade elétrica. Para metais puros, onde a resistência elétrica ocorre somente pelas vibrações da rede cristalina, a resistividade poderia se tornar nula com a redução da temperatura para o valor de 0 K. Esta resistência zero que é hipoteticamente perfeita poderia ser alcançada se pudéssemos resfriar o metal até para o valor zero absoluto, porém, isto não representa o fenômeno da supercondutividade. Quando um metal contém impurezas, estas provocariam uma certa resistividade residual quando a temperatura do metal tivesse o valor de 0 K, e quanto mais impuro o metal, maior o valor desta resistividade residual (figura (8)).

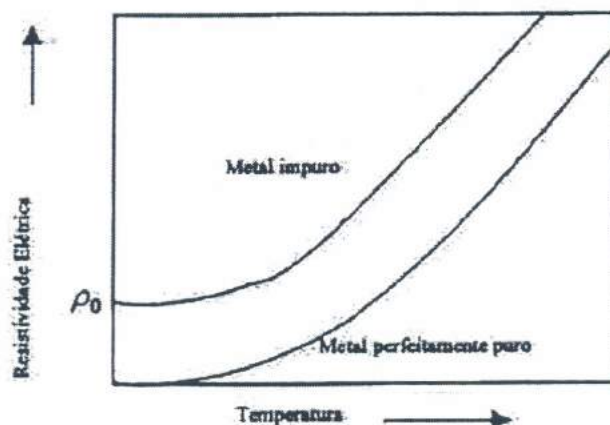


Figura (8): Variação da resistência elétrica com a temperatura.
(Figura adaptada de Rose-Innes [5]).

Certos tipos de metais apresentam uma característica extraordinária, que é a perda abrupta de sua resistência elétrica quando são resfriados para valores de temperatura superiores ao zero absoluto. Esta característica, como visto anteriormente, chama-se supercondutividade, e dizemos que quando um material sofre esta transição ele passa para o estado supercondutor.

O estado supercondutor pode ser alcançado independentemente da apresentação de impurezas no metal. A figura (9) mostra um gráfico da resistividade elétrica em função da temperatura, para um supercondutor.

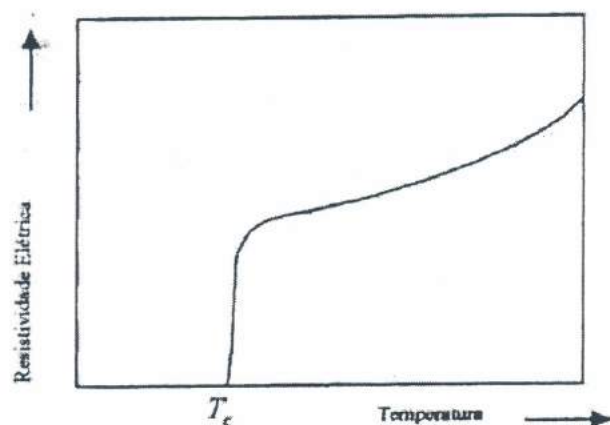


Figura (9): Perda de resistência elétrica de um supercondutor a baixas temperaturas.
(Figura adaptada de Rose-Innes [5]).

No trabalho de Onnes, encontramos o seguinte gráfico (figura (10)) que apresenta informações que complementam os dados anteriores (figuras (8) e (9)). Encontramos neste gráfico a resistividade em função da temperatura para diversos metais, como o ouro (como diversos níveis de pureza), a platina e o mercúrio. Podemos observar que para uma temperatura de 4,2 K a resistência elétrica do mercúrio é menor que $10^{-6} \Omega$ (devido a precisão do equipamento), isto é observado no gráfico da figura (11), que é a figura (10) ajustada em uma nova escala.

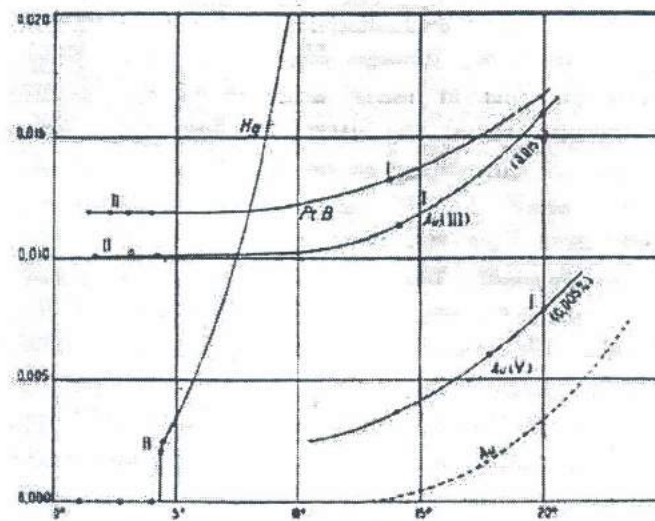


Figura (10): Resistividade em função da temperatura.
(Figura retirada de Onnes [3]).

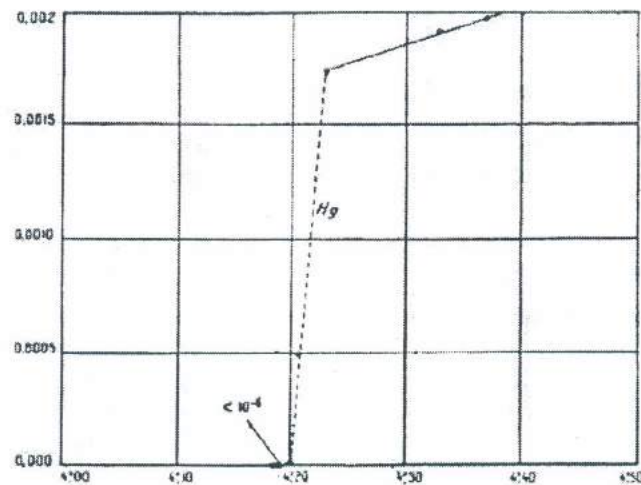


Figura (11): Quando $T=4,2\text{K}$ a resistência elétrica do mercúrio cai abruptamente a zero. (figura adaptada de H. K. Onnes, 1913).

Temperatura Crítica

A temperatura na qual o material torna-se um supercondutor é chamada de *temperatura de transição* ou *temperatura crítica* (T_c) do material. Este valor de T_c é diferente para cada substância. A tabela (1), vista a seguir, mostra a temperatura de transição para os supercondutores metálicos.

E os não metálicos? E os supercondutores de alto T_c !

[illegible]

Tabela (1): Temperatura de transição dos metais.
(Tabela retirada de Rose Innes[1]).

O Efeito Meissner

Pensava-se então que a supercondutividade era somente caracterizada pela resistividade nula, quando os físicos alemães W. Meissner e R. Ochenfeld, em 1933, descobrem que o campo magnético é nulo no interior de um supercondutor, o que faz destes materiais diamagnetos perfeitos. Quando um supercondutor é colocado sobre um campo magnético, ele é repelido, devido ao campo magnético oposto que é gerado pelo supercondutor, pois sabemos que o campo magnético é nulo no interior do supercondutor. Este fenômeno é conhecido atualmente como efeito Meissner, e a supercondutividade, desde então, passa a ser encarada como um novo estado da matéria. A figura (12) representa um supercondutor imerso em um campo magnético.

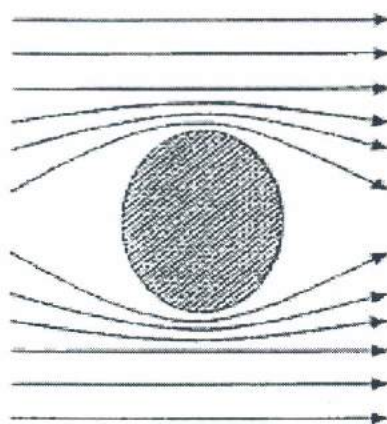


Figura (12): Distribuição resultante de fluxo magnético em torno de um supercondutor.
(Figura adaptada de F. Ostermann et al [8]).

O efeito Meissner é o fator que possibilita algumas das aplicações descritas neste trabalho, já que se torna possível a levitação dos materiais supercondutores (ou dos materiais magnéticos). Quando um supercondutor é colocado sobre um campo magnético, ele é repelido, devido ao campo magnético oposto que é gerado pelo supercondutor, pois sabemos que o campo magnético é nulo no interior do supercondutor. Esta demonstração, visualmente bastante impressionante, é que contribuiu para inúmeras idéias sobre as diversas aplicações para este fenômeno.

Um considerável número de artigos educacionais sobre supercondutores de alta T_c vem discutindo em detalhes a observação do comportamento diamagnético (efeito Meissner) dos supercondutores, que ocorre quando um supercondutor é resfriado a uma temperatura inferior a temperatura crítica.

Como visto acima, quando o material torna-se supercondutor, abaixo da temperatura crítica, a resistência elétrica desaparece. Durante muitos anos a liga de Nb_3Ge manteve o recorde do material cuja temperatura crítica era a mais alta (23 K). A busca para encontrar novos materiais supercondutores que possuíssem temperaturas críticas próximas do valor da temperatura ambiente tem sido o objetivo de muitos cientistas. Em 1986 Bednorz e Müller descobriram a primeira família de cerâmicas supercondutoras de temperatura crítica superior a 30 K. No ano seguinte, pesquisadores (Wu *et al*) [13] desenvolveram a cerâmica supercondutora cuja temperatura crítica possui valores superiores a 90 K. Não foi surpresa alguma que a descoberta gerou uma grande empolgação no mundo da física e torna economicamente viável muitas das aplicações que fazem usos de supercondutores.

Equações eletromagnéticas de um supercondutor

F. e H. London [7] basearam-se no efeito Meissner para desenvolver uma teoria que utiliza as equações de Maxwell para uma explicação do fenômeno da supercondutividade. É importante lembrar que ter conhecimento destas equações é algo relevante para o professor, porém, a sua utilização na sala de aula está fora de cogitação.

As primeiras contribuições para a descrição da supercondutividade foram às relacionadas ao modelo de dois fluidos proposto por F. London. Algumas propriedades podem ser facilmente entendidas com a simples consideração de que alguns elétrons do material comportam-se de maneira normal, aproximadamente como elétrons livres (elétrons normais), enquanto outros apresentam um comportamento “anômalo” (os superelétrons). Desenvolvendo esta teoria, é possível descrever a eletrodinâmica dos supercondutores a partir das Equações de Maxwell e com uma solução complementar que comprova o efeito Meissner.

A seguir, tem-se as equações de Maxwell do eletromagnetismo que serão usadas para demonstrar os fenômenos que ocorrem com os supercondutores.

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3)$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (4)$$

London partiu do princípio de que teria que modificar as equações usuais da eletrodinâmica a fim de descrever o efeito Meissner – é claro lembrar que as equações de Maxwell sempre permanecem válidas. Então concluiu que deveria propor um modelo com dois fluidos diferentes (elétrons normais e superelétrons). Os elétrons normais continuam a obedecer à lei de Ohm $\vec{J}(\vec{r}) = \sigma \vec{E}(\vec{r})$, onde $\vec{J}(\vec{r})$ é a densidade de corrente, $\vec{E}(\vec{r})$ é o campo elétrico e σ é a condutividade elétrica. Mas há, agora, os elétrons responsáveis pela supercondutividade (os superelétrons), para os quais esta lei deve ser modificada. Da densidade total de n elétrons, há uma fração n_s que se comporta de uma maneira “anormal” e representa os superelétrons. Eles não são espalhados nem por impurezas ou vibrações da rede, portanto, não contribuem para a resistividade. Eles são acelerados livremente por um campo elétrico. Sua equação de movimento é então:

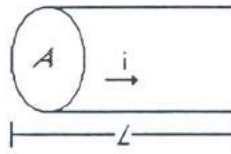
$$\vec{F}_R = m^* \left(\frac{d\vec{v}_s}{dt} \right) = e^* \vec{E} \quad (5)$$

Observa-se que $e^* \vec{E}$ é a força resultante sobre os superelétrons (há somente força elétrica, não existindo forças resistivas) e \vec{v}_s a velocidade resultante. Atualmente sabe-se que estas superpartículas são os pares de Cooper (elétrons pareados), para os quais muitas das vezes:

$$\begin{aligned} M^* &= 2m_e \\ e^* &= 2e \end{aligned}$$

Os valores de m_e e e são respectivamente a massa e a carga do elétron.

Supondo que se tenha um fio de comprimento L e seção transversal A , e que através deste passa uma carga total Ne^* durante um tempo t .



Então pode se escrever a relação a seguir para a densidade de corrente:

$$J = \frac{i}{A} = \frac{\Delta q}{\Delta t} \frac{1}{\frac{V}{L}} = \frac{\Delta q}{\Delta t} \frac{L}{V} = \frac{\Delta q}{\Delta t} \frac{v_s \Delta t}{V} = \frac{Ne^*}{V} v_s = n_s e^* v_s \quad (6)$$

Esta relação pode ser escrita vetorialmente, considerando-se que n_s é o número de superelétrons por unidade de volume se movendo com velocidade v_s .

$$\vec{J} = n_s e^* \vec{v}_s \quad (7)$$

Derivando a equação (7) em relação ao tempo, tem-se:

$$\frac{d\vec{J}}{dt} = n_s e^* \frac{d\vec{v}_s}{dt} \quad (8)$$

Substituindo a equação (5) em (8), temos:

$$\frac{d\vec{J}}{dt} = n_s e^* \frac{e^*}{m^*} \vec{E} = \frac{n_s e^{*2}}{m^*} \vec{E}$$

Reescrevendo a equação acima, tem-se então a 1ª equação de London:

$$\frac{d\vec{J}}{dt} = \frac{n_s e^{*2}}{m^*} \vec{E} \quad (9)$$

A equação acima descreve a propriedade de resistividade nula de um supercondutor. Observa-se que não há necessidade da aplicação de um campo elétrico no supercondutor para manter uma corrente constante no tempo, ao contrário do que ocorre em um condutor normal. De fato, se o campo elétrico for nulo na equação (9), tem-se que a derivada temporal da densidade de corrente também será nula, implicando que a densidade de corrente deve ser uma constante, mesmo

que o campo elétrico seja nulo. Esta expressão foi obtida sem que fosse feito uso de forças dissipativas.

Aplicando o rotacional em ambos os lados da equação (9), temos:

$$\frac{d}{dt}(\nabla \times \vec{J}) = \frac{n_s e^{*2}}{m^*} (\nabla \times \vec{E}) \quad (10)$$

Considerando que o campo elétrico é constante no tempo, temos que a equação (4) se apresenta da seguinte forma $\nabla \times \vec{B} = \mu_o \vec{J}$ (Lei de Ampère) e pela Lei de Faraday-Lenz (3), tem-se que a relação (10) pode ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{d}{dt} \left[\left(\frac{1}{\mu_o} \right) \nabla \times \nabla \times \vec{B} \right] = - \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{n_s e^{*2}}{m^*} \vec{B} \right) \quad (11)$$

Passando o lado direito de (11) para o outro lado, obtemos:

$$\frac{d}{dt} \left[\left(\frac{1}{\mu_o} \right) \nabla \times \nabla \times \vec{B} + \frac{n_s e^{*2}}{m^*} \vec{B} \right] = 0 \quad (12)$$

Para obtenção do efeito Meissner, chega-se a condição complementar, descrita abaixo. Esta é conhecida como 2ª equação de London:

$$\nabla \times \nabla \times \vec{B} + \frac{\mu_o n_s e^{*2}}{m^*} \vec{B} = 0 \quad (13)$$

Usando a seguinte identidade vetorial a seguir

$$\nabla \times \nabla \times \vec{B} = -\nabla^2 \vec{B} + \nabla(\nabla \cdot \vec{B}) \quad (14)$$

e aplicando a equação (2), temos então que:

$$\nabla \times \nabla \times \vec{B} = -\nabla^2 \vec{B}$$

Logo, a 2ª equação de London pode ser escrita da seguinte forma:

$$-\nabla^2 \vec{B} + \frac{\mu_o n_s e^{*2}}{m^*} \vec{B} = 0 \quad (15)$$

Passando o segundo termo de (15) para o outro lado da equação, teremos a segunda equação de London escrita da seguinte forma:

$$\nabla^2 \vec{B} = \frac{\mu_o n_s e^{*2}}{m^*} \vec{B} \quad (16)$$

Para simplificar os estudos das equações de London, será analisada a seguinte situação particular, que pode ser representada pela figura (13).

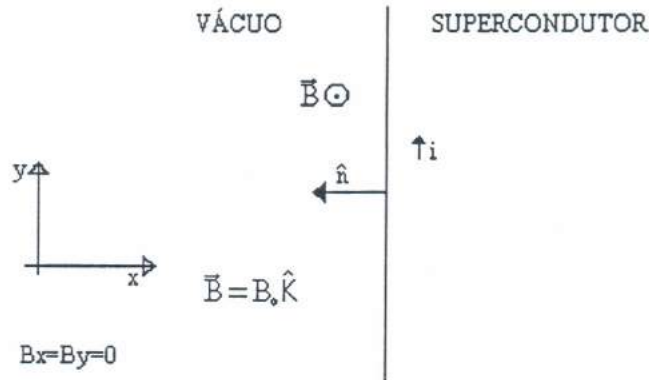


Figura (13): Campo Magnético paralelo à superfície de um supercondutor Infinito.

Pela figura (13) é fácil concluir que:

$$\frac{\partial B_x}{\partial x} = \frac{\partial B_x}{\partial y} = \frac{\partial B_x}{\partial z} = \frac{\partial B_y}{\partial x} = \frac{\partial B_y}{\partial y} = \frac{\partial B_y}{\partial z} = 0 \quad (17)$$

Aplicando a equação de Maxwell (2) e baseado na relação (17), encontramos que:

$$\nabla \cdot \vec{B} = \left(\frac{\partial B_x}{\partial x} + \frac{\partial B_y}{\partial y} + \frac{\partial B_z}{\partial z} \right) = 0 \therefore \frac{\partial B_z}{\partial z} = 0 \quad (18)$$

Pelas propriedades do rotacional de um vetor, podemos escrever que:

$$\nabla \times \vec{B} = \left(\frac{\partial B_z}{\partial y} - \frac{\partial B_y}{\partial z} \right) \hat{i} + \left(\frac{\partial B_x}{\partial z} - \frac{\partial B_z}{\partial x} \right) \hat{j} + \left(\frac{\partial B_y}{\partial x} - \frac{\partial B_x}{\partial y} \right) \hat{k} \quad (19)$$

As condições de contorno para a interface do supercondutor fornecerão a direção e o sentido da corrente elétrica, que pode ser desenvolvido pelo produto vetorial a seguir.

$$\hat{n} \times (\vec{H}_1 - \vec{H}_0) = \sigma \hat{\sigma} = \sigma \hat{j} \quad (20)$$

Na equação acima, temos \hat{n} como o vetor normal à superfície do supercondutor, e $\sigma \hat{\sigma}$ a corrente elétrica do supercondutor. Pela relação (20), conclui-se que a direção da corrente elétrica é \hat{j} .

Aplicando em (19) as condições que foram impostas ao sistema que resultam na relação (17), tem-se que:

$$\frac{\partial B_x}{\partial z} - \frac{\partial B_z}{\partial x} = \mu_o J_y \therefore -\frac{\partial B_z}{\partial x} = \mu_o J_y \quad (21)$$

Se a derivada primeira obtiver um resultado nulo, teremos que a derivada segunda também será igual a zero. Então baseado nisto e desenvolvendo o operador diferencial ∇^2 para B_x , B_y e B_z , tem-se:

$$\nabla^2 B_x = \frac{\partial^2 B_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 B_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 B_x}{\partial z^2} = 0 \quad (22)$$

$$\nabla^2 B_y = \frac{\partial^2 B_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 B_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 B_y}{\partial z^2} = 0 \quad (23)$$

$$\nabla^2 B_z = \frac{\partial^2 B_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 B_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 B_z}{\partial z^2} = \frac{\partial^2 B_z}{\partial x^2} \quad (24)$$

Considerando as relações:

$$\frac{\partial}{\partial x} \equiv \frac{d}{dx} \text{ e } B \equiv B(x)$$

e com os resultados obtidos a partir de (22), (23) e (24), é possível aplica-los na equação (16), que se tornará:

$$\frac{\partial^2 B}{\partial x^2} = \frac{\mu_o n_s e^{*2}}{m^*} B \quad (25)$$

Se a equação (25) for observada com atenção, percebe-se que a unidade do lado esquerdo desta equação é de inverso do quadrado de comprimento, o que nos informa que teremos a mesma unidade do outro lado de (25). Desta forma 25 pode ser reescrita como segue:

$$\frac{\partial^2 B}{\partial x^2} = \frac{B}{\lambda_L^2} \quad (26)$$

onde

$$\lambda_L^2 = \left(\frac{m^*}{\mu_o n_s e^{*2}} \right) \quad (27)$$

Temos como solução da equação (26):

$$B(x) = ae^{+\frac{x}{\lambda_L}} + be^{-\frac{x}{\lambda_L}} \quad (28)$$

Para $x = 0 \therefore B(0) = B_o = a + b$

Para $x = \infty \therefore B(\infty) = 0 \therefore \lim_{x \rightarrow \infty} B(x) = ae^{+\frac{x}{\lambda_L}} = 0 \therefore a = 0$

Então a solução da equação (26) pode ser escrita como:

$$B(x) = B_o e^{-\frac{x}{\lambda_L}} \quad (29)$$

A solução acima indica que o campo magnético é atenuado numa camada de espessura λ_L na superfície do material, caindo a zero no interior do mesmo. A quantidade λ_L , conhecida como comprimento de penetração de London, mede a extensão da penetração do campo magnético no interior do supercondutor. Logo, a Segunda equação de London prevê a ocorrência do efeito Meissner, pois sua solução indica que o campo tende a zero no interior da amostra. A figura (14) ilustra este fenômeno.

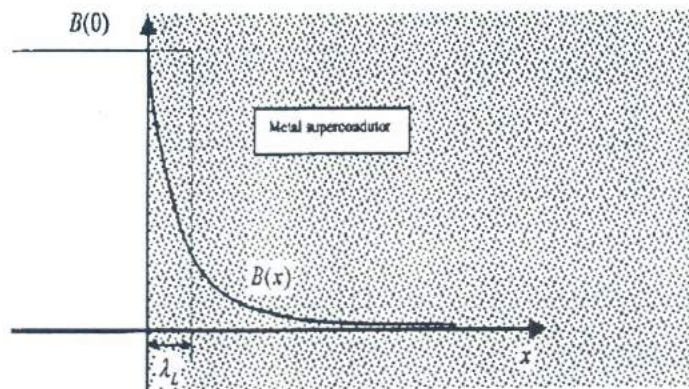


Figura (14): Penetração do fluxo magnético no interior de um supercondutor.
(Figura adaptada de Rose-Innes [5]).

Substituindo os valores numéricos das constantes indicadas na relação (27), encontra-se a seguinte ordem de grandeza para a profundidade de penetração λ_L de um supercondutor metálico: $\lambda_L = 10^{-6}$ cm. Logo, a indução magnética \mathbf{B} só penetra numa película muito fina situada na superfície do supercondutor. Na parte maciça do supercondutor (isto é, para x maior do que a profundidade de penetração λ_L) verificamos que $\mathbf{B} = 0$.

V – Demonstrações e Experimentos sugeridos com supercondutores

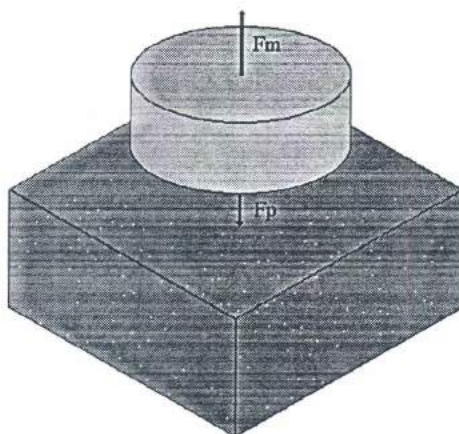
Alguns experimentos simples em supercondutividade podem ser realizados com baixos custos e resultados bastante acurados. Estas características tornam a implementação destes experimentos uma boa opção tanto para os laboratórios que estudam os supercondutores quanto para disciplinas experimentais de física que pode ser em nível de graduação em ciências exatas ou no último ano do ensino médio de um curso técnico (por exemplo).

*você pode dizer
que é um físico
de baixo custo?*

(ii) Levitação Magnética

Como visto anteriormente neste trabalho, o campo magnético é nulo no interior de um supercondutor. Este fenômeno físico possibilita diversas aplicações tecnológicas assim como demonstrações científicas que são visualmente bastante impressionantes.

Para a realização de uma demonstração de levitação magnética, é sugerido aqui que seja feita a colocação do sistema composto por um ímã de terras raras (que seja leve) sobre um bloco de YBaCuO em um recipiente próprio para conter nitrogênio líquido que poderia ser um beaker. A figura (15) mostra o esquema que foi utilizado para fazer tal demonstração. Esta é uma das muitas formas possíveis de realizar uma demonstração de levitação magnética, que foi escolhida devido a ser uma das mais seguras para a sala de aula.



F_m
 F_p
magética
coisa maior

Figura (15): Ímã de terras raras levitando sobre um bloco de YBaCuO.

Na figura (15), tem-se um ímã de terras raras levitando sobre um bloco supercondutor de YBaCuO, onde F_p é a força peso do ímã e F_m é a força magnética que age sobre o ímã, devido ao efeito Meissner. Como o valor de F_p é o mesmo que o de F_m , o ímã levita sobre o supercondutor.

Este tipo de demonstração sempre que realizado em sala de aula ou em feiras de divulgação científica causa grande admiração naqueles que observam o fenômeno.

chame atenção *motiva a observação!*

menção do p. 34! \leftrightarrow Tem que dizer quais os perigos e como evitá-los. 29

É sempre importante lembrar dos cuidados que devem ser tomados quando há a manipulação de nitrogênio líquido, para que não ocorra nenhum acidente.

(ii) Medida da resistência elétrica em função da temperatura de um supercondutor

Objetivos

Nesta experiência objetiva-se que o aluno possa conhecer o comportamento da resistência elétrica em função da temperatura de um supercondutor, utilizando um método simples, de baixo custo e bastante acurado. Sabe-se que para valores de temperatura inferiores a uma temperatura crítica a amostra se encontrará no estado supercondutor, e neste experimento o aluno será capaz de determinar este valor de T_c . *preciso?*

Descrição dos aparatos

O custo dos componentes eletrônicos necessários para a realização do experimento é inferior a R\$ 100,00, e a construção dos aparatos pode ser realizada pelos próprios alunos, devido à simplicidade dos circuitos ~~eletrônicos~~ envolvidos na experiência. A acurácia e a precisão dos resultados dependerão somente da qualidade dos voltímetros utilizados na experiência e da habilidade do experimentador, onde se utilizados equipamentos de medição de alta fidelidade, os resultados poderiam ser comparados aos obtidos pelos melhores laboratórios do mundo.

Em laboratórios educacionais e científicos, a tarefa de medir a resistência elétrica de um supercondutor em função de sua temperatura não é algo tão simples, pois ~~se torna~~ necessário a utilizar compra ou a construção de um controlador de temperatura. O sistema que controla a temperatura da amostra supercondutora é bastante simples e possibilita submeter o supercondutor a ~~valores de~~ temperatura que vão da temperatura de ebulição do nitrogênio líquido até a temperatura ambiente. Este sistema foi utilizado no trabalho de Leon-Rossano [9], e mostrou-se bastante eficiente. Ele consiste de três beakers, que são: (i) beaker (1) que ~~possui volume igual a~~ 500 ml e ~~serviu como~~ recipiente para o nitrogênio líquido; (ii) beaker (2) que ~~possui volume de~~ 150 ml e evita que o nitrogênio entre diretamente em contato com a amostra. Possibilita, ainda, a troca de calor entre a amostra e o banho de nitrogênio líquido; (iii) e o beaker (3) de 50 ml e serve de suporte para a amostra supercondutora. Junto com o supercondutor encontra-se um termopar do tipo K, responsável pela aquisição de dados da temperatura. Na figura 16 ~~a seguir~~, apresenta-se o esquema do sistema utilizado para o controle da temperatura.

becher - um "becker" utilize para e' palavra inglesa

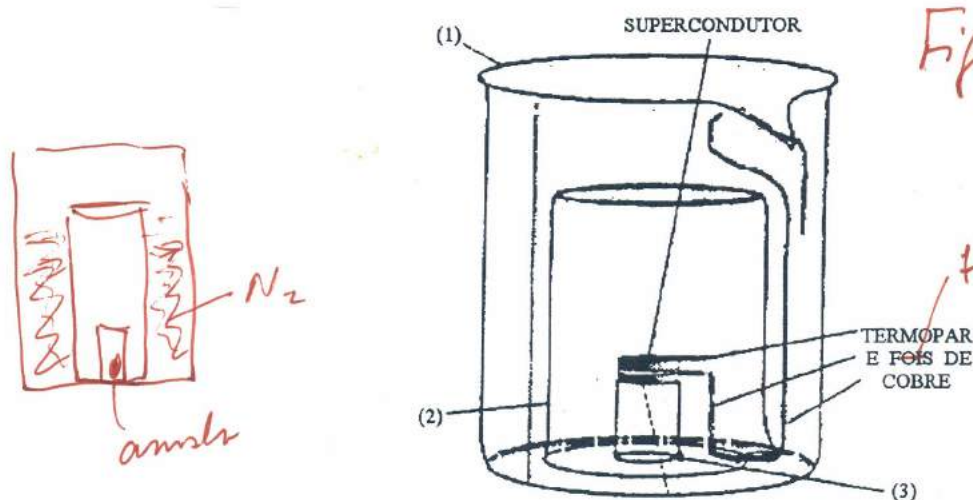


Figura (16): Esquema do sistema utilizado para a variação da temperatura.
(Figura adaptada de León-Rossano [9]).

O esquema de ligação que foi utilizado para efetuar a medida da resistência elétrica pode ser observado na figura (17) abaixo. Foi utilizado o método de quatro pontas, onde dois fios externos servem para inserir a corrente elétrica no supercondutor e os outros dois (internos) servem para medir a diferença de potencial elétrico sobre o supercondutor. Utilizando cola prata, é feita a conexão entre a amostra supercondutora e uma placa de circuito impresso onde esta está fixada. Fios de cobre fazem a ligação entre a placa a fonte de corrente e os instrumentos de medição.

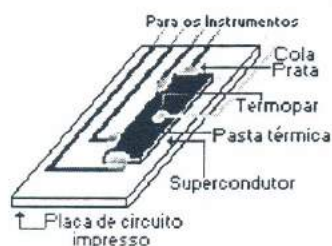


Figura (17): Esquema de ligação da amostra supercondutora.

A amostra supercondutora cerâmica usada neste experimento era uma liga composta de: Itrio, Bário, Cobre e Oxigênio, do tipo "melt-textured" que forma o composto $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$. A figura (18), a seguir, fornece uma idéia das dimensões da amostra.

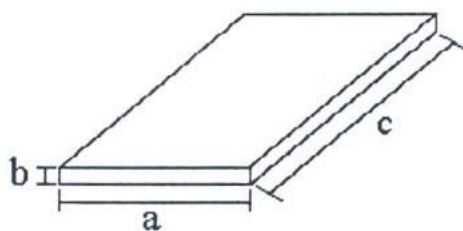


Figura (18): Amostra supercondutora, $a = (4,11 \pm 0,01)\text{mm}$,
 $b = (0,96 \pm 0,01)\text{mm}$, $c = (6,82 \pm 0,01)\text{mm}$.

A corrente elétrica que passa pelo supercondutor é proveniente de uma fonte de corrente contínua e constante, que pode ser ajustada para fornecer diferentes valores de corrente elétrica que variam de 0 até 100 mA. Usa-se um resistor (R_p) de 100Ω (com 1% de precisão) em série com a amostra supercondutora, com a função de determinar o valor da corrente elétrica (I_x) que passa pela amostra, e em paralelo com este resistor é colocado um voltímetro (V_r). O valor da corrente elétrica que percorre o supercondutor é determinado pela razão entre V_r e R_p que fornecerá um valor I_x . O valor da diferença de potencial sobre o supercondutor é determinada com o uso de um microvoltímetro colocado em paralelo com a amostra supercondutora que fornecerá um valor V_x . O valor da resistência elétrica do supercondutor é determinado pela razão V_x/I_x . O esquema elétrico da fonte de corrente pode ser visto na figura (19).

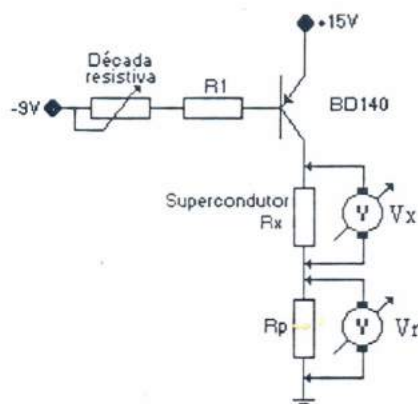


Figura (19): Esquema elétrico da fonte de corrente e dos instrumentos de medição para determinação da resistência elétrica do supercondutor.

Na fonte de corrente descrita na figura (19), através da década resistiva, controla-se o valor da corrente da base do transistor. O resistor R_1 ($10K\Omega$) tem a função de limitar a corrente elétrica máxima que poderá passar pelo supercondutor, e a década resistiva, que está associada em série com o resistor, pode assumir valores que variam de 0 até 10 M Ω . Quanto menor o valor da resistência da década, maior será o valor da corrente elétrica na base do transistor e

O valor da corrente de base do transistor é controlado por uma década resistiva.

Vt (mV)	Temperatura (°C)	Temperatura (K)
-1454	200	73
-1370	180	93
-1269	160	113
-1152	140	133
-1021	120	153
-876	100	173

Tabela (2): Valores de temperatura e tensão para o medidor de temperatura.

A seguir, na figura (21), ^{apresenta-se} ~~tem-se~~ o gráfico da temperatura em função do valor da tensão de saída (Vt) do circuito medidor de temperatura.

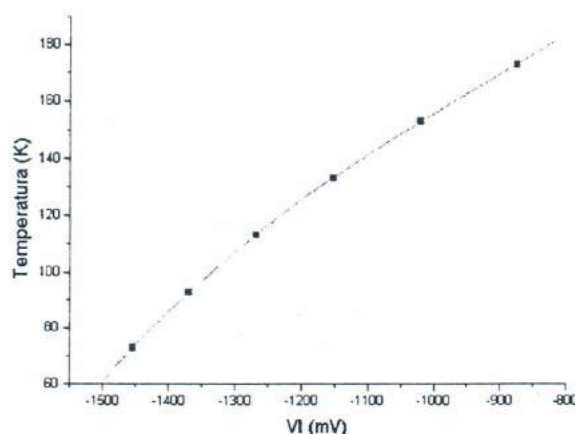


Figura (21): Gráfico da temperatura em função da tensão Vt.

A partir do gráfico acima, ^{T(Vt)} é feito um ajuste de uma função polinomial do terceiro grau para a temperatura em função do valor de Vt, que fornece:

$$T = 398,76757 + (0,47751 \times Vt) + (3,67027 \times 10^{-4} \times Vt^2) + (1,32501 \times 10^{-7} \times Vt^3)$$

Para alimentar os circuitos da fonte de corrente e do medidor de temperatura, foram construídas duas fontes de tensão, com valores de $\pm 5V$ e $\pm 15V$. A figura (22) mostra o diagrama elétrico da fonte de tensão utilizada no experimento.

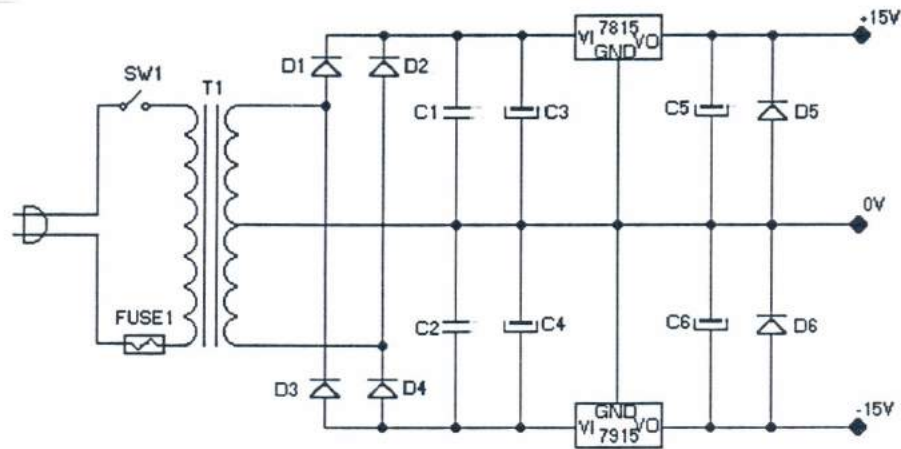


Figura (22): Diagrama elétrico da fonte de alimentação.

Para a fonte de tensão de $\pm 15V$ da figura (22) utilizaram-se os circuitos integrados 7815 e 7915, que podem ser substituídos por 7805 e 7905, respectivamente, para se obter a alimentação de $\pm 5V$.

Caso esta experiência seja realizada em um curso superior de engenharia ou de física, ou ainda numa escola secundária com formação técnica em eletrônica ou eletrotécnica, o circuito poderia ser montado pelos próprios alunos, assim como a confecção de uma placa de circuito impresso (PCI) para fazer as conexões elétricas entre os componentes.

Procedimento Experimental

Inicia-se o experimento com a calibração do medidor de temperatura. Para tal mergulha-se diretamente o termopar no nitrogênio líquido. Como sabemos que a sua temperatura de ebulição à pressão de um atmosfera é de 77 K, este valor corresponderá ao valor de $V_t(N)$ lido e será o menor valor de V_t na nossa escala de temperatura.

Realizada a etapa anterior, é feita a fixação da amostra supercondutora e do termopar no 'beaker' (3) e realizam-se as conexões elétricas entre o supercondutor, a fonte de corrente e os instrumentos de medição. Então, arrumam-se os 'beakers' conforme o esquema da figura (16). Cuidadosamente, usando óculos e luvas de proteção, deve-se despejar vagarosamente e aos poucos o nitrogênio líquido no 'beaker' (1), até que a nível de nitrogênio líquido indicado neste beaker esteja entre 400 e 500 ml. A temperatura da amostra irá diminuindo gradualmente, e quando o valor da indicado pelo termopar for igual a $V_t(N)$, deve-se ligar a fonte de corrente (que já estava previamente ajustada para um valor $I_x \sim 10 \text{ mA}$).

dire em folha de m p. 29 !!

*produzir
levar a*

O valor da corrente não deve ser muito alto por dois motivos: (i) aquecimento da amostra por efeito Joule, que poderia inserir erros na medida; (ii) a possibilidade da corrente que percorre a amostra ser superior a sua corrente crítica e esta não passaria para o estado supercondutor.

←

Após a realização das tarefas anteriores, resta ainda a coleta de dados dos valores de V_x , V_r e V_t até que o nitrogênio se evapore completamente. Neste estágio a variação de temperatura é bastante lenta, pois mesmo depois de todo o nitrogênio líquido evaporado, a variação de temperatura é em média de 1 K a cada três minutos. O valor de V_r (tensão sobre o resistor de 100Ω) não precisa ser anotado em todas as medidas. Estes valores servem agora somente para fazer o monitoramento do valor de I_x . Neste caso, se saberia se existe alguma eventual variação da corrente elétrica que percorre o supercondutor.

←

←

Resultados

(seria interessante colocar a tabela de dados?)

A Figura (23), a seguir, mostra o gráfico que representa a tensão sobre o supercondutor em função do valor obtido pela leitura do medidor de temperatura, que são as medidas "brutas" dos resultados encontrados.

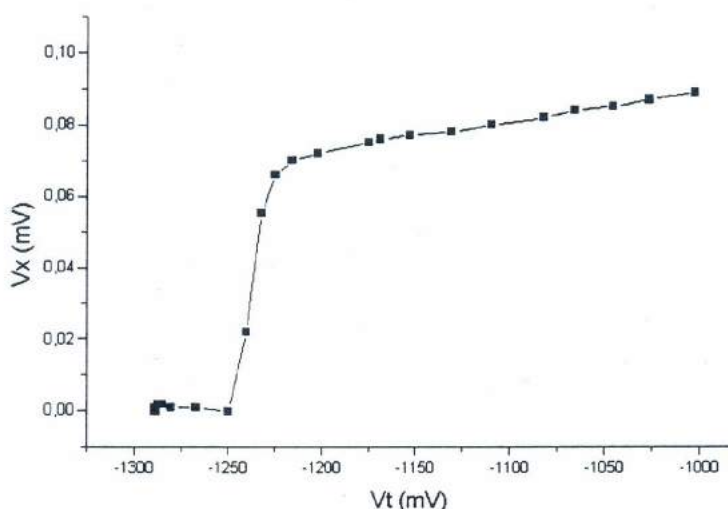


Figura (23): Gráfico da tensão sobre o supercondutor contra o valor obtido pelo circuito medidor de temperatura.

O valor da corrente elétrica que foi ajustada na fonte de corrente para percorrer o supercondutor (I_x) foi de $(10,4 \pm 0,1)$ mA. Este valor de I_x , que praticamente não sofreu variação durante a experiência, foi obtido pela razão $V_r/100\Omega$. Na Figura (24), mostra-se o gráfico da resistência do supercondutor (R_x) em função do valor de tensão fornecido pela leitura do medidor de temperatura. O valor de R_x é obtido pela razão entre V_x e I_x .

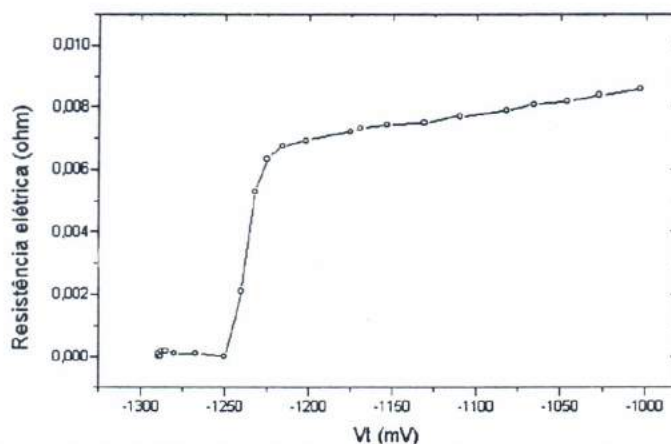


Figura (24): Gráfico da resistência elétrica do o supercondutor em função do valor obtido pelo circuito medidor de temperatura.

Vulgar

A tensão V_T é obtida pela ---

O valor de tensão obtido pela leitura de V_t ao mergulhar o termopar diretamente no nitrogênio líquido foi de -1289 mV. Este valor negativo de tensão é devido a temperatura ser negativa na escala Celsius. Segundo a tabela fornecida pelo fabricante, quando o termopar encontra-se a temperatura de ebulição do nitrogênio líquido a um atmosfera de pressão (77K), o valor de V_t deve ser de -1439 mV, o que sugere que há um erro sistemático no equipamento. Este erro pode ser eliminado subtraindo-se 150 mV ao valor de V_t . A figura (25), apresenta o gráfico da resistência elétrica do supercondutor em função do valor de tensão obtido pelo circuito eletrônico medidor de temperatura, agora ajustado para os valores correspondentes aos fornecidos pelo fabricante do medidos de temperatura.

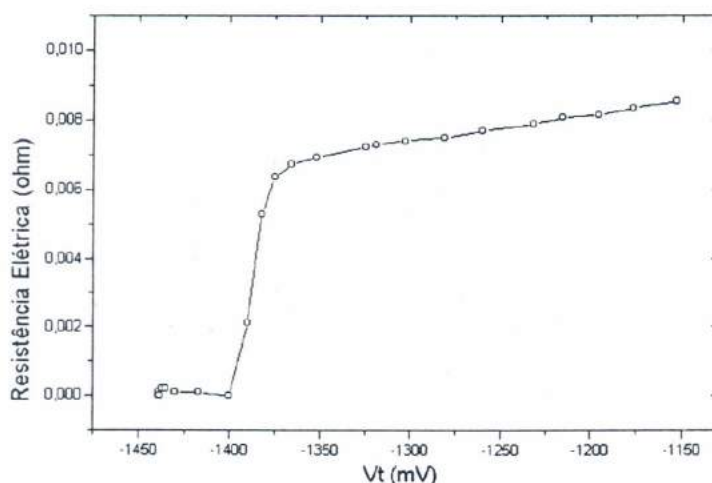


Figura (25): Gráfico da resistência elétrica do supercondutor em função do valor obtido pelo circuito medidor de temperatura com a retirada dos erros sistemáticos.

Com o ajuste de um polinômio de terceiro grau, feito a partir dos dados fornecidos pelo fabricante do CI AD595, obtem-se o valor da temperatura (T) da amostra supercondutora, na escala Kelvin. Agora é possível traçar o gráfico da resistência elétrica do supercondutor em função de sua temperatura, que é visto na figura (26).

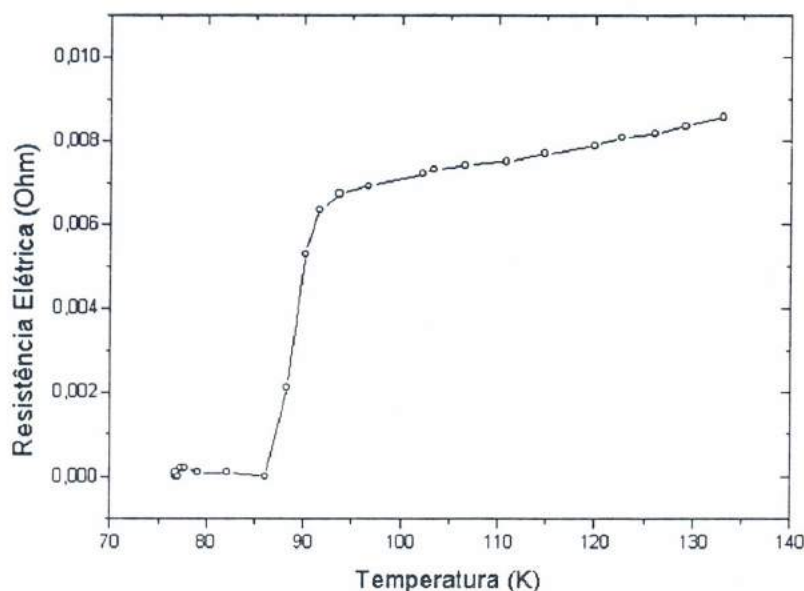


Figura (26): Gráfico da resistência elétrica do o supercondutor em função de sua temperatura.

Análise dos resultados

Os dados obtidos experimentalmente comprovam a eficiência do experimento, onde utilizou-se um método simples e de resultados bastante acurados. *foram obtidos precisos ?*

Como pode ser observado pelo gráfico da figura (26), há um decaimento abrupto da resistência elétrica do supercondutor, o que caracteriza o fenômeno da supercondutividade. *outro*

O gráfico da figura (26) se assemelha muito com outros resultados encontrados por outros laboratórios [9], [11], [12]. *medida, experimentais*

O valor da temperatura crítica (T_c) pode ser encontrado pelo gráfico da derivada primeira da resistência elétrica em relação a temperatura em função da temperatura. Este gráfico pode ser visto a seguir, na figura (27).

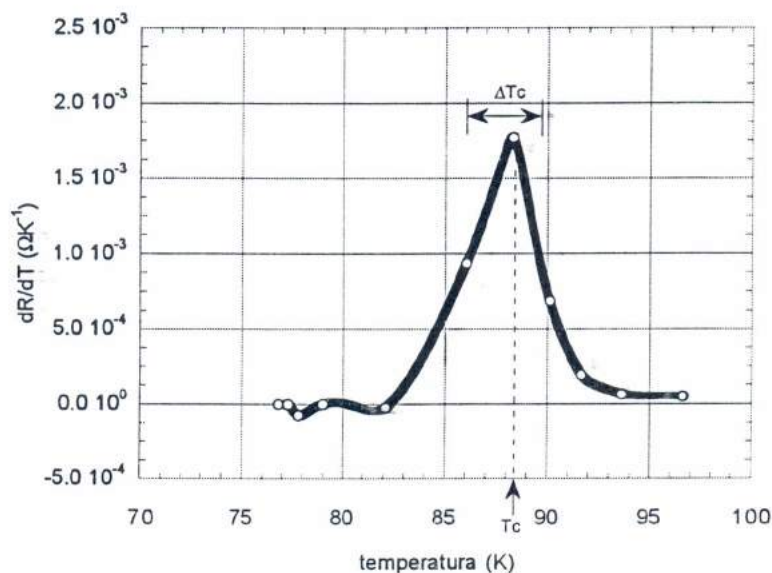


Figura (27): Gráfico de dR/dT em função da temperatura.

Pelo gráfico acima, tem-se que o valor da temperatura crítica da amostra ~~é~~ ^{T_c determinado} encontrado é ~~aproximadamente de~~ ^{experimentalmente} $(88 \pm 2)K$.
 $\approx 2\%$
 $=$
 melhor

VI – Conclusões

O fenômeno da supercondutividade pode ser utilizado como uma ferramenta poderosa na prática pedagógica de um professor, sendo capaz de influenciar positivamente na formação intelectual do aluno, abrindo novas portas para os estudantes e mostrando que ainda há muito para se descobrir e se desenvolver no meio científico.

O experimento sugerido mostrou estar em acordo com as exigências de um laboratório didático devido a vários fatores. Entre eles temos:

- o baixo custo empregado para o desenvolvimento da experiência;
- o tempo gasto com a coleta de dados é relativamente pequeno (cerca de uma hora);
- que fenômenos complexos podem ser apresentados para os alunos de uma forma simples, evitando formalismos matemáticos;
- desenvolve-se nos alunos o raciocínio crítico necessário para uma formação ampla e completa;
- introduz um assunto moderno e de muitas aplicações tecnológicas de uma forma simples e que possibilita a compreensão de todos;

montagem ??
 ?? matemática
 1+2=

- leva para a sala de aula a física como uma ciência de caráter experimental;
- a versatilidade do experimento possibilita a sua execução com outros tipos de amostras supercondutoras como, por exemplo, cerâmicas de Bismuto, Estrôncio, Cálcio e Cobre. *interesse?*

As considerações feitas anteriormente sobre a supercondutividade na prática pedagógica de um professor, confirmam as expectativas de que ciência, tecnologia e educação devem sempre caminhar juntas.

VII – Referências:

- [1] Vidali, G.: *Superconductivity: The next revolution?*. Livro editado por Cambridge University Press, New York, 1993.
- [2] Soulen, R. J. Jr.: *James Dewar, His Flask and Other Achievements*. Physics Today, março (1996) 32-37.
- [3] Onnes, H. K.: *Report on the Researches Made in the Leiden Cryogenic Laboratory between the Second and the Third International Congress of Refrigeration*. Selected Reprints publicadas por American Association of Physics Teachers. Reprinted from Commun. K. Onnes Lab. Univ. Leiden (Suppl. 34b, 1913 – pág. 55-70).
- [4] Nobel, J. de; Lindenfeld, P. (Introdução): *The Discovery of Superconductivity*. Physics Today, setembro (1996) 40-42.
- [5] Rose-Innes, A.C., Rhoderich, E.H.: *Introduction to Superconductivity*. Livro editado por Pergamon, Oxford, 1988.
- [6] Hosoume, Y.; Kawamura, M. R. D.; Menezes, L. C.: *A Física na reforma do ensino médio*. Apresentado no VI Encontro de Pesquisa em Ensino de Física, Atas, Florianópolis, SC, Outubro, 1998.
- [7] London, H.; London, F.: *The Eletromagnetic Equations of the Supraconductor*. Selected Reprints publicadas por American Association of Physics Teachers. Reprinted from Proc. Soc. (London), Vol. A149 (1935) 71-88. *am?*
- [8] Ostermann, F.; Ferreira, L. M.; Cavalcanti, C. J. H.: *Supercondutividade: Uma proposta de inserção ne ensino médio*. Textos de apoio ao professor de física, Instuto de Física – UFRGS, Porto Alegre, nº 8, 1998.
- [9] León-Rossano, L. M.: *An inexpensive and easy experiment to measure the electrical resistance of high-Tc superconductors as a funtion of temperature*. Am. J. Phys. 65 (10), October 1997.
- [10] Luiz, A. M.: *Aplicações de supercondutividade*. Livro editado por Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo, SP, 1992.
- [11] Kirkup, L.: *Resistance measurements as a function of temperature on the high-Tc superconductor YBa₂Cu₃O_{7-δ}*. Eur. J. Phys. 9 (1988) 1-4.

- [12] Pechan, M. J.; Horvath, J. A.: *Quasiequilibrium determination of high-T_c superconductor transition temperatures*. Am. J. Phys. 58 (7), julho de 1990, pág. 642-644.
- [13] Wu, M. K. et al. Phys. Rev. Lett. 58 (1987), 908.
- [14] <http://www.analog.com>
- [15] Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional – 9.394/96 (LDB).
- [16] Parâmetros Curriculares Nacionais do Ensino Médio (PCNEM) MEC/SEMTEC, 1998.